

# 移动带和切向吹气对气动力的影响

袁海东, 李启良, 杨志刚

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

**摘要:** 使用数值计算和风洞试验的方法获得某三厢轿车的气动力, 并采用现有的修正方法对气动力结果进行修正. 对比了气动力的计算值和试验值, 结果表明所采用的数值计算方法所获得的气动力值与试验值一致性较好. 通过对移动带形式和切向吹气角度的研究发现: 移动带形式对气动力影响不大, 气动力系数数值约在 0.002 左右; 切向吹气角度也同样不对气动力造成较大影响.

**关键词:** 移动带; 切向吹气; 数值计算; 风洞试验

**中图分类号:** U467.1<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

## Effect of Moving Belts and Tangential Blowing on Aerodynamic Force

YUAN Haidong, LI Qiliang, YANG Zhigang

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Both numerical simulation method and wind tunnel test were used to measure the aerodynamic force of a sedan. Then, experiment results were corrected by the existing correction method. Comparison results show that the aerodynamic force obtained by the numerical calculation method has good consistency with the test results. Moreover, the study on moving belt form and tangential blowing angle indicates that different moving belts have little effect on the measured value of the aerodynamic force, and the difference of drag coefficient is less than 0.002; the tangential blowing angle also has little effect on the aerodynamic force.

**Key words:** moving belts; tangential blowing; numerical calculation; wind tunnel test

数值计算和风洞试验是进行汽车空气动力学研究的主要方法. 随着计算流体力学和计算机的发展, 数值计算得到越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>, 但数值计算和风洞试验结果的一致性需要进一步的验证.

汽车风洞地面边界层的存在影响汽车周围流场和气动力的测量. 现代汽车风洞边界层的控制方法主要有: 基础抽吸、分布抽吸、移动带系统和切向吹气. 国内外对此进行了一些研究. 文献[2-3]指出, 边界层抽吸减少风洞地面边界层位移厚度, 从而提高测量精度, 但是过度抽吸却改变试验段静压因数分布, 反而带来测量误差. 文献[4-5]中使用数值模拟方法研究最优抽吸率和回风位置. 文献[6]关注转动单元对升力的影响. 上述研究关注了分布抽吸和转动单元, 但很少涉及到移动带和切向吹气, 因此本文开展移动带形式和切向吹气角大小对气动力影响的研究.

## 1 数值计算与试验方法

### 1.1 数值计算方法

汽车在无风的天气和良好、平直的地面条件下行驶时, 前方为均匀自由来流, 地面与空气相对静止, 汽车与地面和空气相对运动, 行驶中的汽车处于半无穷大空间. 本文选取矩形计算域模拟半无穷大空间, 矩形计算域的 6 个面分别为入口、出口、地面、2 个侧面和顶面, 见图 1.

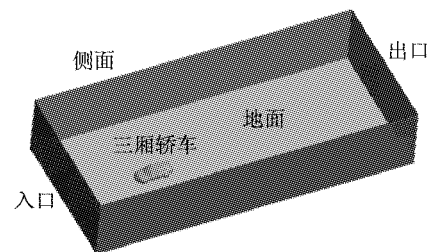


图 1 计算域示意图

Fig.1 Schematic of computational domain

计算域采用混合网格方案. 车身表面网格大小为 16 mm, 发动机舱网格大小为 10 mm, 发动机表面

收稿日期: 2014-12-13

基金项目: 国家自然科学基金 (11302153); 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台 (14DZ2291400)

第一作者: 袁海东 (1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车空气动力学与风洞技术. E-mail: 1310797@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨志刚 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

网格大小为 3 mm,底盘网格大小为 20 mm,汽车面网格总数为 184 万.为了更好地模拟车身表面和地面边界层内的流动,在车身表面和地面设置了边界层网格,第一层网格厚度为 1.5 mm,增长率为 1.2,共 4 层.发动机冷却模块采用多孔介质处理,相关数据由风室试验台获得.体网格采用混合网格,在靠近汽车 3 倍车长、3 倍车宽、2.5 倍车高的矩形区域内采用四面体非结构网格.在外层计算域内采用六面体结构网格,2 种网格交界面处采用五面体网格过渡.为了更好地模拟真实的流动,在发动机舱和汽车尾部流场设置了网格加密区,总的体网格数量为 2 600 万,计算域中间对称面网格见图 2.

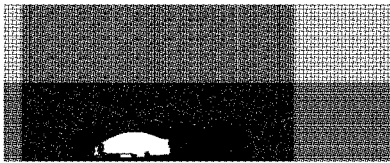


图 2 计算域中间对称面网格

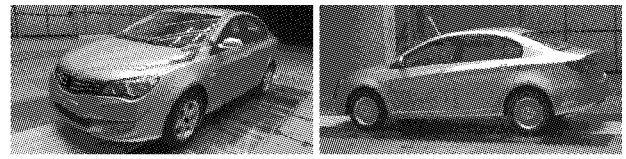
Fig.2 Schematic of mesh on symmetry plane

计算域尺寸为车前 2 倍车长、车尾后 6 倍车长、车两侧各 4 倍车宽、车顶以上 4 倍车高,总体尺寸为长 40 m、宽 18 m、高 8 m.计算域边界条件采用速度入口,入口速度为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,出口采用压力出口,2 个侧面和顶面为对称边界条件,地面根据不同的算例设置不同的边界条件.车轮、刹车盘均设为旋转壁面边界条件,冷凝器和散热器入口和出口设为内部面.在车速为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的工况下,散热风扇关闭,处于风车运行工况.其余边界均为固定壁面边界.

湍流模型采用 Realizable  $k-\epsilon$  两方程模型<sup>[7]</sup>,近壁面函数采用非平衡壁面函数<sup>[8]</sup>.所有算例均采用一阶精度计算 1 000 步后,采用二阶精度计算,残差降到  $10^{-4}$ ,并监测到气动力值不再有明显变化时认为计算结果收敛,气动力系数取计算结果后 500 步的平均值.

## 1.2 风洞试验方法

本文风洞试验在上海地面交通工具风洞中心(SAWTC)的汽车整车气动-声学风洞(AAWT)中完成. AAWT 的喷口面积为  $27 \text{ m}^2$ ,最高风速为  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,具有完备的地面模拟系统,包括基础抽吸、分布抽吸、移动带系统和切向吹气.试验采用与数值计算相同的三厢轿车(见图 3),试验工况和数值计算条件相同.车身表面压力由表面贴片压力传感器测得,气动力系数由气动六分量天平测得.



a 表面压力测量

b 气动力测量

图 3 风洞试验示意图

Fig.3 Schematic of wind tunnel test

为了将风洞试验数据能够应用到实车道路上,需对测量得到的试验数据进行修正.具体修正公式如下<sup>[9-10]</sup>所示:

$$C_{d,\text{cor}} = \frac{(C_{d,m} + \Delta C_{d,\text{HB}})}{(1 + \epsilon_S + \epsilon_N + \epsilon_C)^2} \quad (1)$$

$$C_{l,\text{cor}} = 0.328 + 1.175C_{l,m} + 2.414\epsilon_N - 3.228 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (2)$$

式中: $C_{d,\text{cor}}$ 和 $C_{l,\text{cor}}$ 分别为阻力系数和升力系数的修正值; $C_{d,m}$ 和 $C_{l,m}$ 分别为阻力系数和升力系数的测量值; $\Delta C_{d,\text{HB}}$ 为受水平浮力影响的阻力系数修正值; $\epsilon_S$ 为对射流扩张和偏移的修正; $\epsilon_N$ 为对喷口阻塞效应的修正; $\epsilon_C$ 为对收集口阻塞效应的修正; $A$ 为迎风面积; $L$ 为后保险杠到收集口距离.

## 2 数值与试验结果对比

为了研究数值计算与风洞试验气动力结果的一致性,对同一款三厢轿车的气动力结果进行对比.对比工况为:车速  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,零偏航工况,五带系统开启,切向吹气关闭.

纵向对称面内车身表面压力对比见图 4,烟流对比见图 5.从压力对比和烟流对比可以看出,计算和试验结果比较一致.气动力计算结果见表 1.从气动力系数的对比结果可以看出,修正后气动力系数的计算值和试验值一致性较好.其中,气动阻力系数相差只有 0.047,而气动升力系数相差为-0.016.

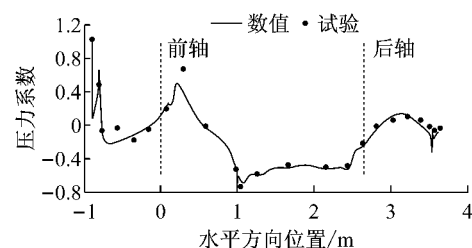


图 4 中间对称面压力对比图

Fig.4 Pressure coefficient on symmetry plane

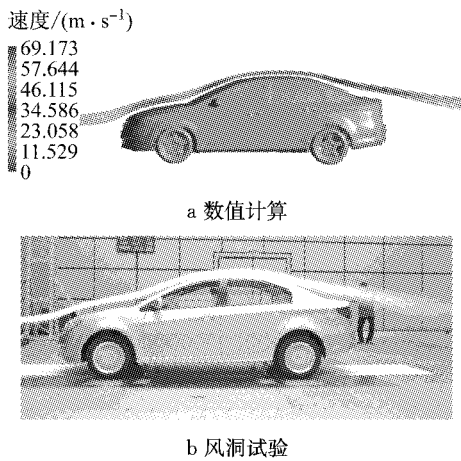


图 5 烟流对比

Fig.5 Contrast of smoke flow

表 1 气动力系数计算和试验结果对比

Tab.1 Comparison of measured and calculated aerodynamic force coefficients

项目	试验值	计算值	差值
气动阻力系数 $C_d$ (未修正)	0.335	0.387	-
气动升力系数 $C_l$ (未修正)	0.152	0.086	-
气动阻力系数 $C_d$ (修正后)	0.339	0.386	0.047
气动升力系数 $C_l$ (修正后)	0.102	0.086	-0.016

注:差值指气动力系数的计算值与试验值之差.

### 3 移动带

风洞移动带系统用来模拟地面的移动,从而去除地面边界层,风洞中常用的移动带形式为五带、三带和单带等.为了研究不同移动带系统对气动力的影响,本文计算了地面移动带、五带、三带和单带(见图 6)在车速为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、零偏航和切向吹气关闭工况下整车气动力.

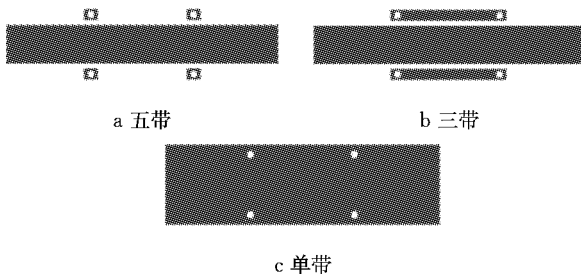


图 6 移动带形式

Fig.6 Different types of moving belts

不同移动带下整车气动力系数见表 2.从表 2 可以看出,3 种移动带形式对气动阻力系数和气动升力系数的影响均较小,相较而言,对升力系数的影响稍大.与地面移动带对比,3 种移动带形式对气动升力的影响较大,仍有很大的改进空间.

表 2 不同移动带形式整车气动力系数

Tab.2 Comparison of aerodynamic force coefficients for different moving belts

移动带形式	气动阻力系数 $C_d$	$\Delta C_d$	气动升力系数 $C_l$	$\Delta C_l$
地面移动带	0.387		0.070	
五带	0.386	-0.001	0.086	0.016
三带	0.387	0	0.083	0.013
单带	0.388	0.001	0.084	0.014

注: $\Delta C_d$  和  $\Delta C_l$  分别表示五带、三带、单带和地面移动带气动阻力和升力系数的差值.

### 4 切向吹气

保持原来的计算域不变,在地面上划分出切向吹气系统的入口设为速度入口,入口速度仍为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,根据切向吹气角大小调整 2 个方向的速度分量.切向吹气入口周围设置网格加密区,总体网格数量增加 200 万.计算工况为:车速  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,移动带为五带系统,研究切向吹气关闭和不同吹气角度对气动力测量值的影响,其他计算参数和设置保持不变.切向吹气的位置和角度如图 7 所示.

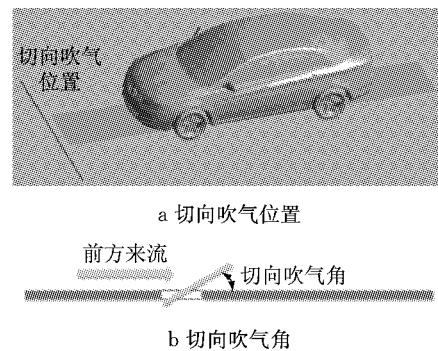


图 7 切向吹气位置和角度

Fig.7 Location and angle of tangential blowing

切向吹气下,整车气动力见表 3.其中,气动力系数的差值均以切向吹气关闭为基准.数值计算结果显示,不同吹气角度对气动力测量值影响不大.其中,切向吹气使得阻力系数测量值减小 0.001,升力

表 3 切向吹气对气动力的影响

Tab.3 Effect of tangential blowing on aerodynamic force

吹气角度	$C_d$	$C_l$	$\Delta C_d$	$\Delta C_l$
关闭	0.386	0.086	0	0
$2.5^\circ$	0.386	0.088	0	0.002
$5.0^\circ$	0.385	0.088	-0.001	0.002
$7.5^\circ$	0.385	0.088	-0.001	0.002
$10.0^\circ$	0.385	0.087	-0.001	0.001

系数增大 0.002. 切向吹气开启和关闭对气动力测量结果影响不大.

风洞试验的结果表明:中央移动带开启,切向吹气角度为  $2.5^\circ$ ,它的开闭对气动阻力系数和气动升力系数影响较小.与关闭相比较,开启后,气动阻力系数减少 0.001,气动升力系数增大 0.002.可见,切向吹气对三厢轿车气动力的影响不大.

表 4 给出在固定地面和车轮静止工况下,切向吹气关闭和  $10.0^\circ$ 的切向吹气开启对气动力系数的影响,可见固定地面下切向吹气开启与否对于气动力影响不大,阻力和升力系数的变化均为 0.001.对比表 3 中的数据,与移动带相比,切向吹气对气动力的影响很小,对去除地面边界层,切向吹气起辅助作用,应与移动带配合使用.

表 4 固定地面下切向吹气对气动力的影响

Tab. 4 Effect of tangential blowing on aerodynamic force with static ground

气动力系数	切向吹气关闭	切向吹气开启	差值
$C_d$	0.389	0.388	-0.001
$C_l$	0.119	0.120	0.001

## 5 结论与展望

本文采用的数值计算方法与修正后的风洞试验结果相比,气动力数值一致性较好.通过研究移动带形式和切向吹气发现:3种移动带形式对气动力系数影响不大,与地面移动带相比3种移动带形式对气动升力的影响较大,仍有较大的改进空间.数值计算和风洞试验的结果均显示:移动带开启时,切向吹气开启与否及不同的切向吹气角度对气动力测量的影响不大,气动力系数差值小于 0.002.固定地面下,切向吹气开启与否对气动力系数的影响为 0.001,切向吹气对于去除地面边界层起辅助作用,应与移动带配合使用.

为了进一步扩展本文研究结果的应用,有必要针对更小离地间隙的跑车和赛车展开气动力研究.

### 参考文献:

[1] 张扬军,吕振华,徐石安,等.汽车空气动力学数值仿真研究

进展[J].汽车工程,2001,23(2):82.

ZHANG Yangjun, LÜ Zhenhua, XU Shian, *et al.* A review on numerical simulation of automotive aerodynamics [J]. Automotive Engineering, 2001, 23(2):82.

[2] Gerhard W, Stefan D, Ludger L. Gradient effects on drag due to boundary-layer suction in automotive wind tunnels[C]// Social Automotive Engineering. [S.l.]: SAE, 2003; 2003-01-0655.

[3] Jochen W, Oliver F, Jiabin P. Further investigations on gradient effects[C]// Social Automotive Engineering. [S.l.]: SAE, 2004; 2004-01-0670.

[4] 杨帆,李启良,陈枫,等.分布抽吸率对整车风洞试验段流场影响的数值模拟[J].计算机辅助工程,2008,17(4):36.

YANG Fan, LI Qiliang, CHEN Feng, *et al.* Numerical simulation on influence of distributed suction rate on flow field in test section of full scale wind tunnel[J]. Computer Aided Engineering, 2008, 17(4): 36.

[5] 杨志刚,李启良,杨帆.抽吸气体回送位置及流量比例对整车风洞试验段流场影响的研究[J].汽车工程,2010,32(4):283.

YANG Zhigang, LI Qiliang, YANG Fan. A study on the effects of drawn air flow back location and flow ratio on the flow field in the test section of full scale wind tunnel[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(4): 283.

[6] 杨志刚,丁宁,李启良,等.移动带系统升力实验与数值研究[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(6):900.

YANG Zhigang, DING Ning, LI Qiliang, *et al.* Experimental and numerical studies on moving belt system lift force[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(6): 900.

[7] Tsan-Hsing S, William W L, Aamir S, *et al.* A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation [J]. Computers Fluids, 1995, 24(3):227.

[8] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 1974, 3(2): 269.

[9] Edzard M, Jochen W. On the correction of interference effects in open jet wind tunnel[C]// Social Automotive Engineering. [S.l.]: SAE, 1996; 960671.

[10] Jeffrey H, Bill M, Stephen A, *et al.* Development of lift and drag corrections for open jet wind tunnel tests for an extended range of vehicle shapes[C]// Social Automotive Engineering. [S.l.]: SAE, 2003; 2003-01-0934.